



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH-28  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**A VERDADEIRA VOCAÇÃO DA PCH NO BRASIL**

**Dr. Eng. Gervásio Luiz de Castro Neto\***  
**VOITH SIEMENS HYDRO**  
**02995.000 – São Paulo, SP - Brasil**

**Eng. Glauco Vinicius de Freitas**  
**VOITH SIEMENS HYDRO**  
**02995.000 – São Paulo, SP - Brasil**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta os conceitos para o dimensionamento de reservatórios, energia gerada, soluções de arranjos de grupos com turbinas Francis horizontais e verticais e considerações genéricas para a implantação de vertedores em Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's. Além destes, também uma comparação de custo entre PCH's com turbinas Francis horizontais e verticais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Pequena Central Hidrelétrica - PCH, turbina Francis.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O objetivo fundamental deste trabalho é provocar, por parte das empresas e projetistas, uma reflexão sobre alguns conceitos utilizados no desenvolvimento de projetos para pequenas centrais hidrelétricas. A PCH não é uma miniatura de uma grande central hidrelétrica. Muitos projetos básicos apresentados para colher propostas dos equipamentos, refletem esta consideração.

A partir da década de 50 do século passado a engenharia brasileira começou a pensar somente em usinas elétricas de grande porte. Muito dos conceitos que norteavam a construção das pequenas usinas foram esquecidos. Existem muitas usinas hidrelétricas de pequeno porte operando em nosso país desde o início do século 20. A atualização daquelas idéias podem servir de modelo para os novos projetos, porém, ao contrario do que acontecia a 50 anos atrás, quando estas usinas eram praticamente a base da geração elétrica no Brasil, hoje a implantação da PCH na maior parte do país, praticamente só é viabilizada quando for construída a "Fio d'água", interligada com o

sistema elétrico nacional e provavelmente comandada à distância.

Com o crescimento do consumo elétrico as PCH's podem se tornar muito importantes para suprir as pontas do sistema, principalmente para atender as pequenas cidades e indústrias. Dentro deste conceito de construção a "Fio d'água" e, a fim de garantir a operação na ponta do sistema, deve ser incluído um pequeno reservatório destinado a armazenar a água para os períodos de seca. O dimensionamento deste reservatório é crítico, em virtude da obrigatoriedade da manutenção da vazão sanitária em épocas de vazões mínimas.

Outra solução é a PCH trabalhar em pequenos sistemas isolados para suprir cargas em lugares distantes. Neste caso, a usina deve ter um reservatório que possa fornecer a carga do sistema durante o período integral, ou seja, é, tanto na ponta como fora da ponta da carga.

**2.0 - DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

**2.1 Usina a Fio d'água sem Reservatório**

A potência a ser instalada é escolhida em função da vazão mínima do rio. Normalmente utiliza-se uma pequena soleira para o desvio das águas que se destinam a geração de energia.

Nesse tipo de usina os equipamentos eletromecânicos representam a maior parte do investimento, podendo chegar a 2/3 do total investido.

**2.2 Usina a Fio d'água com Reservatório de Regularização Diário**

\*Rua Friedrich Von Voith, 825 - CEP 02995-000 – São Paulo - SP - BRASIL

Tel.: (011) 3944-4574 - Fax: (011) 3944-4809 - E-MAIL: gervasio.castro@vs-hydro.com

Duas considerações devem ser feitas sobre a demanda de carga durante o período de ponta:

- O custo elevado da energia neste período do dia;
- O aumento das perdas, no momento da ponta, onde o sistema de transmissão é muito exigido;

A implantação de uma PCH próxima de pequenas cidades ou indústrias é uma excelente solução, pois permite aumentar a capacidade do sistema de transmissão e suprir a carga de ponta com uma energia mais econômica.

No período seco, a vazão mínima pode ser acumulada em um pequeno reservatório durante a maior parte do dia, podendo ser utilizada em plena capacidade dos grupos de PCH no momento de ponta do sistema elétrico. Normalmente das 17:30h às 20:30h.



FIGURA 1 – BARRAGEM E TOMADA D'ÁGUA DA PCH FUMAÇA.

### 2.3 Usina com Reservatório de Regularização Anual

Neste caso o reservatório deve ser dimensionado para a usina atender a carga elétrica exigida pela rede elétrica em qualquer instante. A potência da usina é escolhida de forma a se obter uma geração elétrica que utiliza diariamente a vazão próxima da média anual do rio para os anos secos. Estudos hidrológicos são feitos para esta determinação.

## 3.0 DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES A SEREM UTILIZADAS NAS TURBINAS.

### 3.1 Curva de Permanência das Vazões

A curva de permanência das vazões é a forma mais simples da hidrologia para a determinação da vazão a ser turbinada pelos grupos geradores.

Gráfico de vazões médias diárias medidas no rio (y) x tempo (x), em que o tempo é dimensionado em porcentagem.

Serão necessários muitos anos de informações para a curva de permanência ter boa confiabilidade. Muitas vezes é difícil obter esta quantidade de dados de vazões. Para PCH's o período mínimo de 10 anos é

razoável, desde que se tenha dados pluviométricos do local da usina por um período de tempo maior.

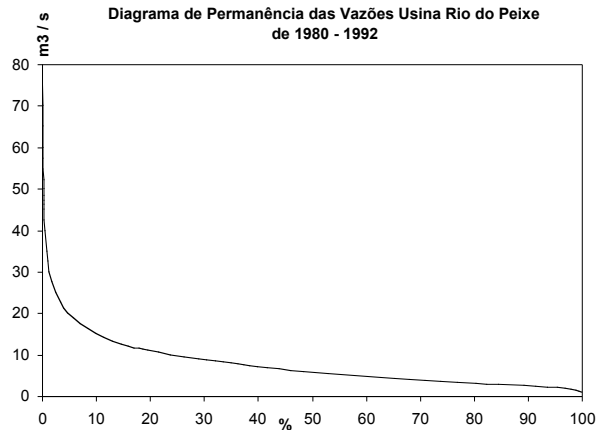


FIGURA 2 – CURVA DE PERMANÊNCIA DE UMA PCH.

### 3.2 - Diagrama de Massas de Vazões

Para determinação do volume do reservatório pode-se utilizar o "Diagrama de Massas das Vazões", que consiste em verificar como as vazões turbinadas e vertidas se comportam em função das vazões afluentes do rio no local em estudo da PCH. Com este estudo, determina-se o volume de água do reservatório. Este fluxo é feito para um número de muitos anos de medidas de vazões diárias ou mensais pré determinadas por estudos hidrológicos.

A seguir é apresentado na tabela 1 um exemplo de diagrama de massas de vazões médias mensais, para um ano de vazões e com as seguintes características:

- Volume do reservatório =  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;
- Vazão a ser utilizada nas turbinas com potência máxima =  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Vazão mínima a ser utilizada no dia para produzir a potência máxima em 4,8 horas =  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Ano Mês	Vazão Média $\text{m}^3/\text{s}$	Volume Afluent. $10^6 \text{ m}^3$	Volume Reserv. $10^6 \text{ m}^3$	Vazão Turbinad $\text{m}^3/\text{s}$	Vazão Vertida $\text{m}^3/\text{s}$	Volume Turbin. $10^6 \text{ m}^3$
Jan/53	16,8	45,00	2,00	10,0	6,80	26,78
Fev/53	12,6	31,68	2,00	10,0	2,64	25,06
Mar/53	9,77	26,19	2,00	9,77	0	26,19
Abr/53	7,56	19,61	2,00	7,56	0	19,61
Mai/53	5,56	14,90	2,00	5,56	0	14,90
Jun/53	4,43	11,49	2,00	4,43	0	11,49
Jul/53	3,16	8,48	2,00	3,16	0	8,48
Ago/53	2,42	6,50	2,00	2,42	0	6,50
Set/53	1,88	4,89	1,70	2,00	0	5,18
Out/53	1,70	4,57	0,92	2,00	0	5,36
Nov/53	1,90	4,95	0,68	2,00	0	5,18
Dez/53	2,32	6,23	1,56	2,00	0	5,36
VOLUME TURBINADO TOTAL					160,09 x $10^6 \text{ m}^3$	

TABELA 1 – DIAGRAMA DE MASSAS DE VAZÕES.

Quando não se conhecem muitos dados sobre as vazões diárias, é possível, determinar as vazões médias, através de medições de pluviometria, desde

que estes dados sejam conhecidos ou exista correlação com bacias hidrográficas próximas ao local de estudo.

#### 4.0 - DETERMINAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE UMA PCH PARA GERAR NA PONTA POR MÉTODO SIMPLIFICADO

Quando são conhecidas as vazões médias mensais, por vários anos pode-se fazer o fluxo das vazões somente ao longo dos meses secos destes anos.

Exemplo - Determinar o volume de um reservatório que forneça no mínimo a vazão de 10 m<sup>3</sup>/s durante 3,5 horas do dia, conhecendo-se as vazões médias mensais durante o período seco entre 1980 e 1996.

TABELA 2 – VAZÕES MÉDIAS EM m<sup>3</sup>/s NO PERÍODO SECO ENTRE 1980 E 1996.

ANO	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Média Anual
1980	3,15	3,02	3,05	1,81	7,51
1981	2,71	4,59	9,56	9,56	7,52
1982	4,29	3,37	6,01	5,25	9,58
1983	5,70	9,19	11,49	10,59	18,68
1984	4,03	3,77	2,85	3,91	10,58
1985	2,74	2,46	1,82	4,09	6,35
1986	4,22	2,64	2,45	3,35	6,78
1987	3,24	3,46	2,94	5,29	7,14
1988	2,87	2,16	3,79	3,56	6,42
1989	2,57	2,93	1,93	5,48	6,31
1990	2,78	2,61	3,28	3,88	5,28
1991	3,06	2,83	5,53	3,89	8,89
1992	2,64	4,42	6,56	8,20	7,50
1993	2,47	3,40	2,33	2,55	5,42
1994	1,92	1,31	1,28	2,13	4,92
1995	1,72	1,55	4,12	2,67	7,26
1996	1,78	3,10	3,31	9,31	5,65

O ano de 1994 foi o ano de maior seca do período. Se a usina hidrelétrica estivesse operando naquela oportunidade e necessitasse consumir 10 m<sup>3</sup>/s durante 3,5 horas, equivalente ao consumo de 1,46 m<sup>3</sup>/s mais a vazão sanitária de 0,20 m<sup>3</sup>/s totalizando 1,66 m<sup>3</sup>/s durante 24 horas.

As vazões médias diárias turbinadas durante os meses de Setembro e Outubro de 1994 ficariam abaixo de 1,66 m<sup>3</sup>/s e haveria consumo de água do reservatório para complementar as vazões do rio da seguinte forma:

- Mês de Setembro: faltou 0,35 x 30 dias x 24 horas x 3600 s = 907.200 m<sup>3</sup>;
- Mês de Outubro: faltou 0,38 x 31 dias x 24 horas x 3600 s = 1.017.792 m<sup>3</sup>;

Nesta condição o reservatório deveria ter no mínimo 1.924.992 m<sup>3</sup>. Com os dados pluviométricos da região entre 1953 e 1988, foi possível estimar as vazões médias mensais para este período. O ano de 1963 foi o mais seco, apresentando as seguintes vazões médias mensais em m<sup>3</sup>/s:

Ano	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
1963	1,60	1,20	1,30	1,10	1,20	3,76

Para atender as vazões do período seco de 1963, o reservatório deveria ter 4.920.480 m<sup>3</sup>. Analisando todos os dados, verificou-se que adotando o volume de 3.000.000 m<sup>3</sup>, o único ano que haveria falha de acumulação de água no reservatório seria 1963, isto é, com os dados até 94 seria 1 em 42 anos, correspondente 2,4 % do período.

#### 5.0 - SOLUÇÕES DE ARRANJOS DE PCH'S

##### 5.1 Grupos com Turbinas Francis Horizontais

A utilização de grupos de geradores com turbinas Francis Horizontais, tornam a solução mais econômica para as PCH's. O edifício da Casa de Força fica reduzido a um galpão, com ponte rolante em cima de uma base composta pelas comportas de sucção, os grupos geradores e os auxiliares eletromecânicos da usina. O tempo de implantação da usina é menor, ajudando na recuperação do capital investido.

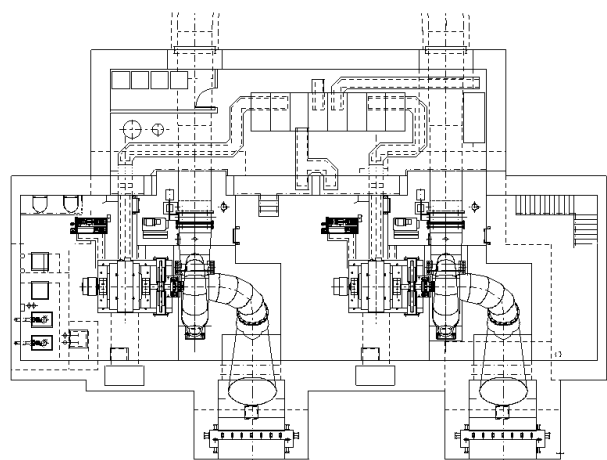
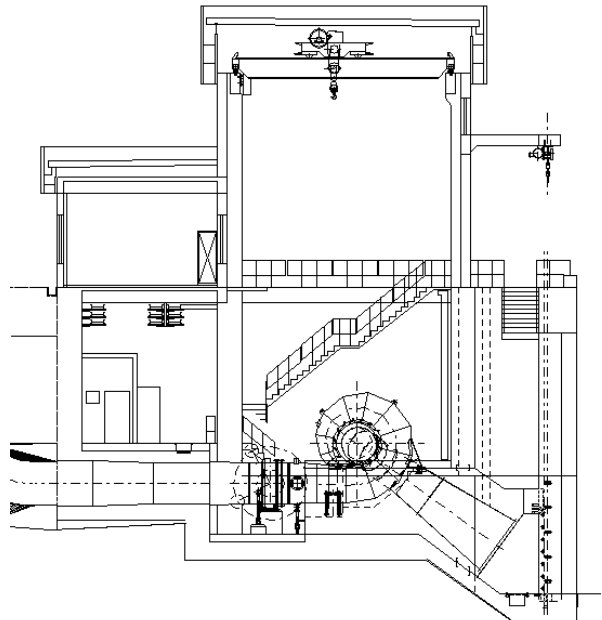


FIGURA 3 – EXEMPLO DE UMA CASA DE FORÇA PARA TURBINAS FRANCIS HORIZONTAIS.



FIGURA 4–CASA DE FORÇA DA PCH RIO DO PEIXE

### 5.2 Grupos em Turbinas Francis Verticais

Excepcionalmente poderá ser utilizada a solução da Casa de Força com turbinas Francis Verticais, nos seguintes casos:

- Quando o fabricante já possuir os projetos e as ferramentas construtivas da turbina e gerador, utilizados em fabricações anteriores, minimizando assim os custos dos equipamentos e o tempo de fabricação;
- Quando as turbinas Francis horizontais tem dimensões acima de valores máximos definidos pelos fabricantes;
- Na utilização de número menor de grupos com o objetivo de diminuir os custos dos componentes hidromecânicos;
- Deve ser levado em consideração que para grupos verticais normalmente os rendimentos são maiores que os grupos horizontais;

A implantação de grupos Francis Verticais em usinas de baixa queda muitas vezes levam a soluções pouco econômicas;

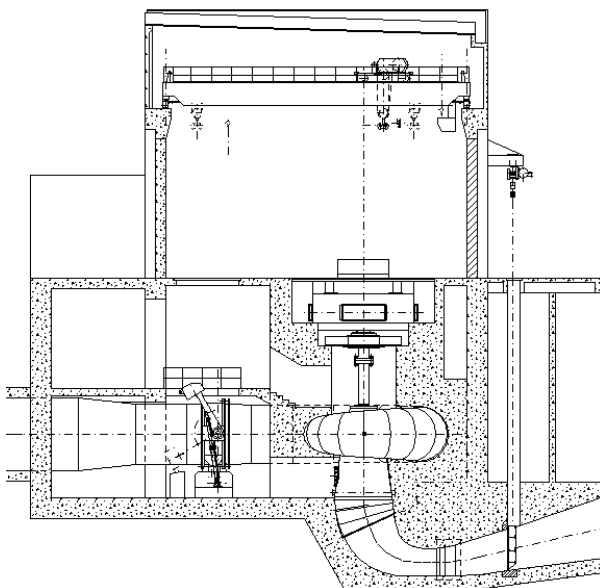


FIGURA 5 - EXEMPLO TÍPICO DE FRANCIS VERTICAL – CORTE PELA UNIDADE GERADORA.

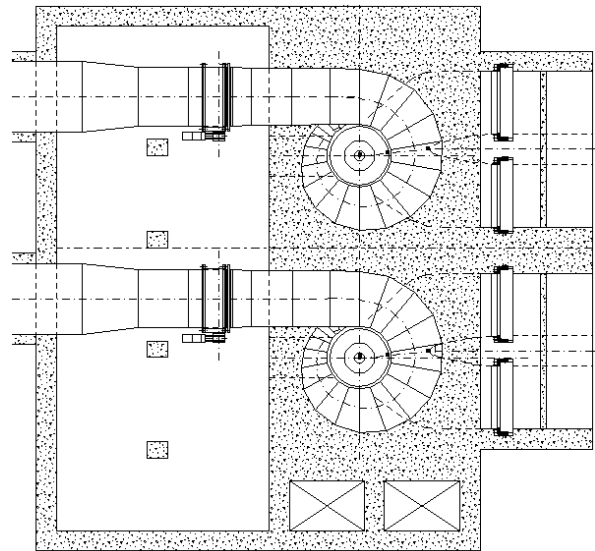


FIGURA 6 - EXEMPLO TÍPICO DE FRANCIS VERTICAL – PLANTA DA UNIDADE GERADORA.

### 5.3 Utilização de Outros Tipos de Turbinas em PCH's

Além das turbinas Francis e, dependendo de certas características, tais como: queda líquida, variações de carga elétrica do sistema elétrico, outros tipos de turbinas poderão ser utilizadas em PCH's.

#### 5.3.1 Grupos com Turbina Kaplan Horizontais

Nas PCH's de "baixa queda" tornam-se inviáveis a utilização de turbinas "Francis horizontais". A utilização de grupos Kaplan horizontais, tipo "S", muitas vezes tornam o investimento atrativo, devido principalmente a utilização de geradores horizontais e a possibilidade da turbina Kaplan permitir a aplicação de cargas mínimas em torno de 25 a 30% da potência nominal do grupo.

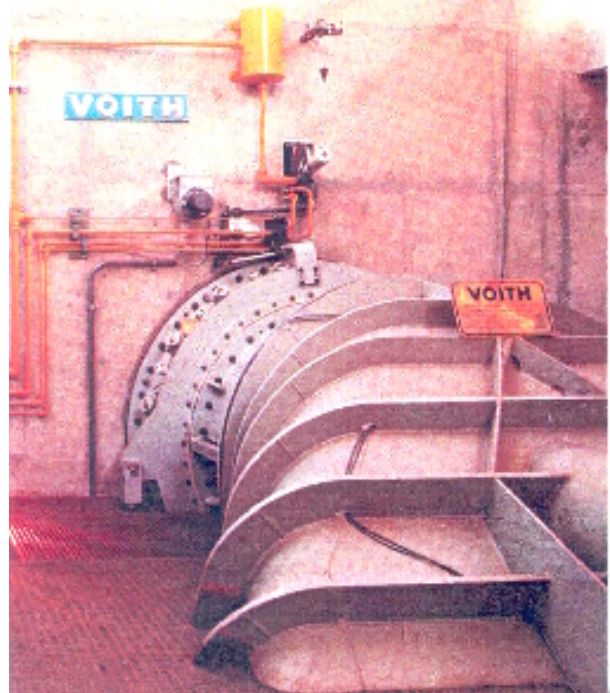


FIGURA 7 - PCH BORTOLAN TURBINA KAPLAN "S"



Vale a pena ressaltar que o valor de carga mínima a ser aplicada em uma turbina Francis é da ordem de 50% da potência nominal.

### 5.3.2 Grupos com Turbina Kaplan Verticais

Dependendo da queda de água na turbina, são utilizadas excepcionalmente turbinas Kaplan verticais, quando se justificar a utilização de menor número de grupos e a carga mínima da usina necessitar de 1/4 da potência nominal de 1 grupo:

Exemplo: PCH com 2 grupos e carga mínima 1/8 da potência nominal da Usina. Neste caso se os grupos fossem Francis, seriam necessários 4 grupos.

Quando a usina trabalha para atender a ponta do sistema e tem reservatório, normalmente os grupos trabalham próximos ou a plena carga.

### 5.3.3 Grupos com Turbina Pelton

Para grandes quedas, a solução da turbina é a Pelton e os grupos são montados na disposição horizontal.

## 6.0 - VERTEDOR

O custo da PCH é muito influenciado pela implantação do tipo de vertedor. Deve-se evitar ao máximo a implantação de comportas no vertedor, pois elas encarecem bastante a PCH, tanto no investimento inicial como nas despesas de operação e manutenção.



FIGURA 8 – VERTEDOR TIPO SOLEIRA LIVRE E TOMADA D'ÁGUA DA PCH RIO DO PEIXE.

## 7.0 -COMPARAÇÃO DE CUSTO ENTRE PCH COM TURBINAS FRANCIS HORIZONTAL E FRANCIS VERTICAL

### 7.1 Dados Iniciais

Para esta comparação foi adotado as seguintes soluções:

#### 1) Grupo Francis Horizontal:

- Potência: 3 x 9,5 MW;
- Rendimento dos grupos turbina / gerador / transformador: 88,13%;

- Energia gerada: 184.000 MWh.

#### 2) Grupo Francis Vertical:

- Potência: 2 x 14,25 MW;
- Rendimento dos grupos turbina / gerador / transformador: 90,10%;
- Energia gerada: 188.000 MWh;

### 7.2 Custos Envolvidos

#### **Solução I**

- Custo dos Eletromecânicos: R\$ 26.000.000,00
- Custo da Construção Civil: R\$ 37.000.000,00
- Custo do Projeto: R\$ 2.500.000,00
- Custo do Gerenciamento: R\$ 3.000.000,00
- Custo das despesas gerais: R\$ 1.000.000,00
- Custo Total da PCH: R\$ 69.500.000,00

#### **Solução II**

- Custo dos Eletromecânicos: R\$ 29.000.000,00
- Custo da Construção Civil: R\$ 35.500.000,00
- Custo do Projeto: R\$ 2.500.000,00
- Custo do Gerenciamento: R\$ 3.000.000,00
- Custo dos Terrenos e despesas gerais: R\$ 1.000.000,00
- Custo Total da PCH R\$ 71.000.000,00

## 8.0 ANÁLISE SUSCINTA DOS INVESTIMENTOS E RETORNO DAS 2 SOLUÇÕES

- Taxa de juros do empréstimo : 15% a. a.
- Amortizado em 10 anos, com 2 anos de carência pagando somente os juros.
- Valores dos empréstimos:

### 8.1 Solução I - 3 x Grupos Francis Horizontais

- Gasto no 1º ano: R\$ 42.000.000,00
- Empréstimo no 1º ano: R\$ 42.000.000,00
- Gasto no 2º ano: R\$ 27.500.000,00
- Empréstimo no 2º ano: R\$ 27.500.000,00
- Período de construção: 16 meses;

Ano	Receita em 1000 Reais	Amortização do 1º Empréstimo	Amortização do 2º Empréstimo	Fluxo Financeiro em 1000 Reais
1				
2	6.000,00	6.300,00		-300,00
3	14470,00	6.300,00	4.125,00	4045,00
4	14470,00	9.359,70	4.125,00	985,30
5	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
6	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
7	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
8	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
9	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
10	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
11	14470,00	9.359,70	6.128,38	-1.018,08
12	14470,00		6.128,38	8.341,62
Fluxo Financeiro em 12 anos sem juros no período				5.945,36

### 8.2 Solução II - 2 x Grupos Francis Verticais

- Gasto no 1º ano: R\$ 43.000.000,00
- Empréstimo no 1º ano: R\$ 43.000.000,00
- Gasto no 2º ano: R\$ 28.000.000,00
- Empréstimo no 2º ano: R\$ 28.000.000,00
- Período de construção: 23 meses;

Ano	Receita em 1000 Reais	Amortização do 1º Empréstimo	Amortização do 2º Empréstimo	Fluxo Financeiro em 1000 Reais
1				
2	1.000,00	6.450,00		-5.450,00
3	14790,00	6.450,00	4.200,00	4.140,00
4	14790,00	9.582,55	4.200,00	1.007,45
5	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
6	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
7	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
8	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
9	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
10	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
11	14790,00	9.582,55	6.239,80	-1.032,35
12	14790,00		6.239,80	8.550,20
Fluxo Financeiro em 12 anos sem juros no período				1021,2

### 8.3 Consideração Final

Neste caso a implantação de PCH com grupos horizontais é mais econômica que a utilização de grupos verticais.